

УДК 621.91

**В.Д. КОВАЛЬОВ**, д-р техн. наук,

**Я.В. ВАСИЛЬЧЕНКО**, канд. техн. наук, Краматорськ, Україна

## **ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ВИРОБІВ ВАЖКОГО МАШИНОБУДУВАННЯ З ВРАХУВАННЯМ ФАКТИЧНОГО СТАНУ ПРОЦЕСУ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ**

Розроблена система адаптивного управління роботою важкого токарного верстата зі створенням законів оптимального управління технологічною системою.

Разработана система адаптивного управления работой тяжелого токарного станка с созданием законов оптимального управления технологической системой.

The adaptive control system by of a heavy lathe work with creation of optimum control laws of technological system is developed.

*Вступ.* Виробництво важкого металургійного, енергетичного, транспортного обладнання є основою машинобудування України та важливою складовою частиною її експорту. Можливість виготовлення важких машин, конкурентоспроможних на світовому ринку, забезпечується оснащенням машинобудівних підприємств сучасним верстатним обладнанням. З розвитком промисловості посилюються вимоги до машин, підвищується точність їх виготовлення, застосовуються нові марки матеріалів, які дають можливість досягнення нового рівня експлуатаційних характеристик. Технологічні процеси автоматизованих виробництв повинні бути забезпечені обладнанням високого класу точності з високою стабільністю характеристик функціонування.

Технологічне обладнання с позиції теорії управління є багатоконтурною системою з нелінійними елементами та нестационарними властивостями. В процесі експлуатації обладнання змінюється його динамічний стан не тільки при переході від однієї операції до іншої, але й при типових операціях технологічного процесу. Априорно врахувати всі зміни практично неможливо. Таким чином, при призначенні оптимальних режимів різання необхідно враховувати безліч факторів, які пов'язані з фактичним станом заготовки, інструменту та всієї технологічної системи в цілому. Цим і визначається актуальність оптимізації режимів механічної обробки виробів важкого машинобудування з врахуванням фактичного стану процесу в режимі реального часу. Критерії, принципи та приклади оптимізації наведені в роботах [1-4], які вирішують задачу управління.

В ДДМА вже декілька десятиріч проводяться роботи, спрямовані на підвищення якості і працездатності верстатного обладнання та різального інструменту, адаптивних систем керування для важких верстатів, розробку інтегрованих технологій зміцнення інструменту і деталей машин [4-8]. Але питання, що зазначені у завданнях досліджень, потребують нових комплексних досліджень і розробок в напрямку створення інтегральних систем адаптивного управління процесом різання на важких верстатах з урахуванням стану інструменту.

Важкі верстати нового покоління мають всі технічні можливості для регулювання параметрів обробки безпосередньо під час різання в режимі реального часу. Сучасні системи ЧПК дозволяють використовувати пре - та постпроцесори, а також інформацію від вимірювальних пристроїв, які фіксують параметри процесу обробки (температуру, зусилля, крутні моменти, вібрації та ін.). За допомогою цих засобів в процесі обробки динамічно коректується початкова програма ЧПК з режимними параметрами та геометрією інструменту. Окрім цього, є можливість здійснення управління з системою самонавчання, зі змінною структурою управління, багатомірними зворотними зв'язками. Для здійснення управляючого впливу використовуються і розробляються нові мехатронні системи [9].

*Розробка законів управління технологічною системою на базі важкого верстата.* Специфічні особливості важкого машинобудування не дозволяють механічно переносити прогресивні методи технології й організації, які використовуються в багатосерійному і масовому виробництвах, на підприємства, що роблять різні види унікальних машин.

Процес обробки деталей одночасно розглядався як фізичний, кінематичний та організаційно-виробничий. В цьому процесі беруть участь такі елементи: заготовка, що є об'єктом обробки; різальний інструмент, що впливає на заготовку; верстат, що забезпечує установку й закріплення заготовки й різального інструменту; необхідні основні й допоміжні робочі рухи і т.д.

Параметри, що характеризують описані вище елементи процесу механічної обробки деталей, будучи характеристиками умов обробки, являють собою вхідну інформацію при регулюванні процесу обробки.

Встановлено, що протікання процесу механічної обробки на важких верстатах у часі в реальних умовах обумовлено дією безлічі факторів, що впливають на хід процесу й мають найчастіше випадковий характер зі значним розсіюванням параметрів [10]. Так детермінувати процес, щоб всі фактори, що визначають його протікання в будь-який момент часу, були враховані заздалегідь, неможливо. Можна, звичайно, використовувати стохастичні прийоми програмування, але якщо вони засновані на

статистичних методах, то не виключене виникнення невизначених ситуацій і завжди можливий ризик, що процес відхилиться від заздалегідь запропонованої програми. Урахувати виниклі ситуації в процесі різання на важких верстатах, щоб його протікання відповідало поставленим завданням, можливо оперативним втручанням у процес щораз із появою відхилення або при тенденції до відхилення.

Закони управління технологічною системою в процесі обробки формуються так, щоб на основі первинних параметрів, які характеризують обраний тип заготовки (матеріал, розмір, припуск и т.д.) та прийнятий метод обробки (верстат, пристосування, схема різання, технологічне середовище), змінюючи параметри керування (режими різання, варіант й геометричні параметри інструменту, параметри й структуру несучої системи верстату), впливати на параметри регулювання (механіка процесу різання, наростоутворення, стружкоутворення, теплові явища, сила та міцність різання, вібрації) та одержати необхідні технологічні параметри (точність, якість, стійкість міцність та інструменту, продуктивність, економічність, форма стружки) (рис. 1).



З метою вирішення проблеми забезпечення високопродуктивної та високоточної автоматизованої обробки деталей важкого машинобудування, в тому числі з нових марок важкооброблюваних матеріалів, розроблено інтегральний комплекс оптимального управління технологічною системою, який включає важкий верстат, системи інструментів і інструментозабезпечення, систему адаптивного керування з комплектами вимірювальних і діагностичних засобів, математичні моделі функціонування технологічної системи.

Алгоритми роботи оптимальної системи адаптивного керування формуються із включенням критеріїв: собівартість обробки, продуктивність, точність, надійність системи та ін. Структура адаптивної технологічної системи має високий ступінь обхвату зворотними зв'язками: по відносному положенню й траєкторіям формотворних рухів елементів системи; їх фізичному стану й обурюючим факторам. Якість роботи адаптивної технологічної системи оцінюється на підставі процесно-орієнтованого підходу за допомогою теорії кваліметрії як якість складної ієрархічної системи, що дозволяє кількісно оцінити ефективність різних варіантів схем, визначити вагомі фактори й інформативні канали діагностування. Адаптивне керування процесом різання будується на базі багаторівневої системи прийняття рішень із елементами штучного інтелекту.

Серед факторів, які ускладнюють реалізацію алгоритму адаптивного керування процесом різання слід виділити те, що на момент призначення раціональних режимів обробки відсутня повна інформація про параметри процесу різання. Така невизначеність, іноді дуже значна, носить принциповий характер та не може бути усунена до появи інформаційних сигналів в процесі різання.

У детермінованій постановці задачі така ситуація може бути описана так. Якщо  $X$  – множина технологічно допустимих варіантів плану,  $F(x)$  – вектор продуктивності при реалізації плану  $x \in X$ , а  $G(x)$  – затрати. Вектор – функції  $F: X \rightarrow R^k$  та  $G: X \rightarrow R^l$  вважаються заданими. Якщо  $F_0 \in R^k$  – планове завдання, то вибір плану виконується з допустимої множини  $X(F_0) = \{x \in X | F(x) \geq F_0\}$  у відповідності з заданим критерієм  $G(x)$  (при  $l > 1$  – векторним).

Якщо планування здійснюється в умовах невизначеності, то конкретний вигляд функцій  $F$  та  $G$  залежить від невідомого раніше

комплексу умов, які складаються в процесі обробки. Обмежившись для спрощення дискретним випадком, допустимо, що комплекс цих умов може сформуватися в одному з  $N$  варіантів (станів процесу), при чому  $i$ -му варіанту відповідають функції продуктивності і затрат  $F_i: X \rightarrow R^k$  та  $G_i: X \rightarrow R^l$  ( $i=1 \dots N$ ). Якщо ставити вимогу безумовного виконання завдання  $F_0$ , то допустима множина приймає вигляд:

$$X(F_0) = \{ x \in X \mid F_i(x) \geq F_0, i=1 \dots N \}, \quad (1)$$

а критерій  $G_i(x)$  на цей раз залежить від стану процесу. Однак, такі жорсткі принципи формування допустимої множини різко звужують сукупність допустимих планів та фактично орієнтуються на найменш сприятливі умови реалізації процесу обробки. Процесу механічної обробки більш адекватна модель двох етапів, яка передбачає можливість адаптивного регулювання. Регулювання здійснюється після того, як стан процесу став відомим, та виявилось, що реалізація прийнятого плану  $x \in X$  не забезпечує виконання завдання  $F_0$ .

Можливості коректування плану, які вважаються незалежними від стану процесу, характеризуються допустимою множиною заходів корекції  $Y$  та функціями  $\varphi: Y \rightarrow R^k$  та  $\gamma: Y \rightarrow R^k$ , де  $\varphi(y)$  та  $\gamma(y)$  - додаткові продуктивність та затрати при здійсненні заходів корекції  $y \in Y$ .

При розробці системи адаптивного управління наряду з планом  $x \in X$  проектується ряд заходів корекції  $y_1 \dots y_N$ . Розширений план  $u = (x, y_1 \dots y_N)$  вибирається з множини:

$$U = U(F_0) = \{ (x, y_1 \dots y_N) \mid x \in X, y_i \in Y, F_i(x) + \varphi(y_i) \geq F_0, i=1 \dots N \}, \quad (2)$$

та оцінюється при реалізації  $i$ -го стану процесу вектором:

$$V_i(u) = (V_{i1}(u), \dots, V_{il}(u)) \equiv G_i(x) + \gamma(y_i), i=1 \dots N, \quad (3)$$

Якщо інформація про імовірність реалізації стану процесу обробки відсутня, то при виборі розширеного плану  $u \in U$  слід прямувати до скорочення затрат  $V_i(u)$  у кожному з потенційно можливих станів  $i=1 \dots N$ . У виниклій таким чином двічі багатокритеріальній (внаслідок можливої багатопараметричності затрат, а також наявності  $N > 1$  станів процесу) задачі  $(U, V)$  векторний критерій  $V = (V_1, \dots, V_N): U \rightarrow R^{lN}$ , який задано на множині, виділяє з останнього сукупність  $V$  – ефективних планів:

$$\varepsilon(U, V) \equiv \{ u \in U \mid V(v) \leq V(u), v \in U \} \Rightarrow V(v) = V(u) \} \quad (4)$$

Серед компонент векторного критерія, який використовують для вибору рішень з множини  $U$  необхідно враховувати також надійнісні характеристики. Якщо  $z=(z_1, \dots, z_l)$  – рівень затрат, який планується на стадії розробки розширеного плану  $u=(x, y_1 \dots y_N)$ ; вектор  $z$  приєднається в якості додаткової змінної задачі до плану  $u$ . Рівень затрат  $z$  задовольняє обмеження  $z \geq z^*$ , де  $z^* > 0$ .

Надійність  $R_j(u, z)$  плану  $(u, z)$  по  $j$ -й компоненті затрат характеризуємо середнім перевищенням фактичних затрат над запланованим рівнем:

$$R_j(u, z) = \sum_{i=1}^N p_i [V_{ij}(U) - z_j], j=1, \dots, l, \quad (5)$$

Разом із характеристикою  $R_j(u, z)$  представляє інтерес відносна характеристика надійності:

$$r_j(u, z) = R_j(u, z), j=1, \dots, l, \quad (6)$$

Приєднання до вектору  $z$  вектор-функції  $R_j(u, z) = (R_1(u, z), \dots, R_l(u, z))$  або  $r_j(u, z) = (r_1(u, z), \dots, r_l(u, z))$  дозволяє сформулювати два варіанти багатокритеріальної моделі.

У першому варіанті на множині  $U = \{u, z \mid u \in U, z \geq z^*\}$  задан  $2l$ -мірний векторний критерій  $\Phi_I(u, z) = (z, R(u, z))$ . У другому варіанті на тій же множині векторний критерій має вигляд:  $\Phi_{II}(u, z) = (z, r(u, z))$ . У кожній з задач всі компоненти векторного критерія підлягають мінімізації.

Задача 1 обмежує область плануємого рівня затрат  $z$  та відповідного розширеного плану  $u$  сукупністю ефективних рішень:

$$\varepsilon(U, \Phi_I) = \{u, z \in U \mid ((u', z') \in U, \Phi_I(u', z') \leq \Phi_I(u, z)) \Rightarrow \Phi_I(u', z') \leq \Phi_I(u, z)\}, \quad (7)$$

Аналогічним чином задача 2 виділяє ефективну множину  $\varepsilon(U, \Phi_{II})$ .

$$\Phi_{II}(u', z') \leq \Phi_{II}(u, z) \Rightarrow \Phi_I(u', z') \leq \Phi_I(u, z); (u, z), (u', z') \in U, \quad (8)$$

Ці задачі можуть бути використані для побудування межі Парето. Результатом параметричного аналізу є крива компромісу між двома цілями. Такий підхід може бути використаний також при наявності чотирьох та більше критеріїв. Достатньо виділити яку-небудь пару з них та зафіксувати значення інших на визначених рівнях.

*Висновки.* Така методика реалізована у дослідному зразку адаптивної системи керування для важкого токарного верстата та інтегральному комплексі оптимального управління адаптивною технологічною системою. Результати роботи використані для розробки сучасних важких верстатів нового покоління, аналогів яких ще не існує. Розроблені верстати повністю конкурентоспроможні на світовому рівні.

Подальший розвиток законів управління технологічною системою важкого верстату повинен іти в напрямку розробки багаторівневої системи «штучного інтелекту» на базі системи адаптивного керування з перемінною структурою.

**Перелік посилань:** 1. *B. Arezoo, K. Ridgway, etc.* Selection of cutting tools and conditions of machining operations using an expert system // *Comput. Ind.* 42 (2000), p. 43–58. 2. *Y. Shin, Y. Joo* Optimization of machining conditions with practical constraints, *Int. J. Prod. Res.* 30 (1992), p. 2907–2919. 3. *I. Yellowey, E. Gunn* The optimal subdivision of cut in multipass machining operations, *Int. J. Prod. Res.* 27 (1989), p.1573–1579. 4. *B. Gopalakrishnan, F. Al-Khayyal* Machine parameter selection for turning with constraints: an analytical approach based on geometric programming // *Int. J. Prod. Res.* 29 (1991), p.1897–1908. 5. *Ковалев В.Д., Мельник М.С.* Система адаптивного управления точностью с улучшенной динамикой для тяжелых станков./ *Вестник ЖДТУ «Процессы механической обработки, станки и инструменты»*, Житомир, 2003.- Т.1.- С.69-76. 6. *Ковалев В.Д.* Основы теории расчета и проектирования гидравлических опорных узлов станочного оборудования // *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку* - Краматорськ: ДДМА, 2004.- С. 9. 7. *Ковалев В.Д., Васильченко Я.В. и др.* Применение ОИМП для упрочнения деталей машин и режущего инструмента / *Вісник двигунобудування*, 2004.- №4. – С.149-152. 8. *Клименко Г.П., Мироненко Е.В., Васильченко Я.В.* Оптимизация процесса обработки деталей сборными резцами с учетом стружкодробления // *Современные технологии, экономика и экология в промышленности, на транспорте и в сельском хозяйстве.* - Киев: ИСМО.- Алушта.- 1998.- С.169-171. 9. *Zatarain, M., Ruiz de Argandona, etc.* New Control Techniques on State Space Observers for Improving the Precision and Dynamic Behaviour of Machine Tools, *Annals of the CIRP*, 54/1, p.393-396. 10. *Васильченко Я.В., Ковалев В.Д.* Управление процессом обработки на тяжелых станках с помощью алгоритма оптимального регулирования/ *Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем.*- Вып. 19.-Краматорск, 2006.- с.24-33.